

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОТВОДА КОЛЬЦЕВЫХ И ПРЯМЫХ РЕБЕР ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Аннотация

Рассмотрена математическая модель для определения эффективности кольцевых и прямоугольных ребер воздушного охлаждения заданного профиля. Разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать температурное поле ребра и отводимую им тепловую мощность при разных исходных параметрах. Посредством компьютерного моделирования проведено сравнение эффективности тепловой работы кольцевых и прямых ребер воздушного охлаждения.

Ключевые слова: подовый электрод, тепловой поток, воздушное охлаждение, эффективность ребра.

Abstract

A mathematical model to determine the effectiveness of rectangular and circular air cooling fins specified profile. Developed a computer program that allows you to calculate the temperature field edges and withdrawn their heat output for different input parameters. Through computer simulations, the comparison of the effectiveness of thermal annular ribs and direct air cooling.

Keywords: bottom electrode, heat flow, the cooling air, the efficiency of the ribs.

Одним из основных элементов дуговой печи постоянного тока (ДППТ) является конструкция токоподвода к шихте. Для подвода тока к переплавляемому материалу в ДППТ используется либо токопроводящая подина с токопроводящими элементами, либо один или несколько стержневых подовых электродов.

Как правило, ДППТ выполняются с использованием составных стержневых подовых электродов, имеющих водяное либо воздушное охлаждение. Зона охлаждения вынесена за пределы кожуха печи, а для контроля над тепловым состоянием подовый электрод снабжен термопарами [1].

Теплообмен между двумя средами может быть интенсифицирован ребрением той поверхности, на стороне которой коэффициент теплоотдачи меньше. Снижение общего термического сопротивления системы приводит к увеличению передаваемого теплового потока при неизменном температурном напоре и размере первичной поверхности; при постоянном тепловом потоке можно уменьшить максимальную температуру стенки.

Для охлаждения подового электрода можно использовать прямые и кольцевые ребра (рис. 1); поперечное сечение ребер может иметь различные профили: прямоугольный, трапециевидный, гиперболический, треугольный (как частный случай гиперболического) и т. п.

Целью данной работы является разработка программного обеспечения, позволяющего выбирать рациональные параметры ребристой поверхности и проводить оценку эффективности выбранного типа ребра охлаждения.

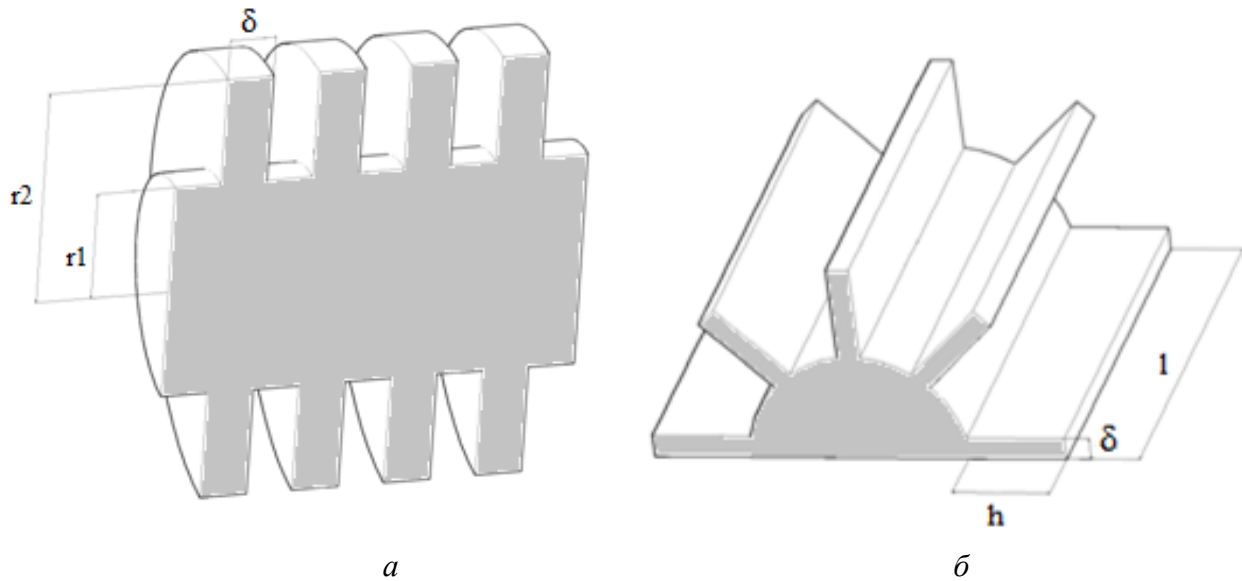


Рис. 1. Виды ребристых поверхностей: *a* – кольцевые ребра; *б* – прямые ребра прямоугольного профиля

Кольцевые ребра

Будем считать, что безразмерная толщина ребра изменяется по степенному закону $\tilde{\delta} = \delta_r / \delta_0 = R^{-p}$, причем $p = 0$ соответствует прямоугольному ребру, $p > 0$ – гиперболическому ребру, $\delta_0 = \delta_r(r_1)$. В этом случае уравнение теплопроводности в кольцевом ребре имеет следующий вид [2]:

$$R^2 \frac{d^2 \theta}{dR^2} + (1-p)R \frac{d\theta}{dR} - \frac{N^2}{(R_2-1)^2} R^{p+2} \theta = 0, \quad (1)$$

где $R = r/r_1$, $R_2 = r_2/r_1$, $\theta = (t - t_{\text{ж}})/(t_0 - t_{\text{ж}}) = \vartheta/\vartheta_0$ – безразмерная температура, t_0 – температура ребра у его основания ($r = r_1$); $N = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda \cdot \delta_0}}(r_2 - r_1)$ – характеристический параметр ребра; $t_{\text{ж}}$ – температура окружающей жидкости; λ – коэффициент теплопроводности материала ребра; α – коэффициент теплоотдачи.

Для постановки краевой задачи дополним выражение (1) граничными условиями: на границе ребра и цилиндрической стенки

$$\theta|_{R=1} = 1; \quad (2)$$

на краю ребра

$$\left. \frac{d\theta}{dR} \right|_{R=R_2} = 0. \quad (3)$$

Определим тепловую эффективность ребра η , как отношение отводимого им теплового потока Q_0 к тепловому потоку Q_{max} , который отвело бы такое же ребро с бесконечно боль-

шой теплопроводностью и постоянной температурой всей поверхности, $\vartheta_0 = \text{const}$. Тепловая мощность, отводимая кольцевым ребром в окружающую среду

$$Q_0 = 4\pi\alpha\vartheta_0 r_1^2 \int_1^{R_2} \theta \cdot R \cdot dR. \quad (4)$$

В идеальном случае максимальная тепловая мощность, отводимая ребром $Q_{\max} = 2\pi\alpha\vartheta_0 (r_2^2 - r_1^2)$, отсюда получаем выражение для эффективности кольцевого ребра

$$\eta = 2 \frac{r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \int_1^{R_2} \theta \cdot R \cdot dR. \quad (5)$$

Прямые ребра

В этом случае будем считать, что толщина ребра изменяется по закону $\tilde{\delta} = \delta_y / \delta_0 = \left(\frac{Y+b}{1+b} \right)^p$, где $Y = y/h$ – безразмерная координата; p , b – безразмерные параметры задающие профиль ребра; h – высота ребра. Уравнение теплопроводности в прямом ребре имеет вид

$$Z^2 \frac{d^2\theta}{dz^2} + zp \frac{d\theta}{dz} - N^2 (1+b)^p Z^{2-p} \theta = 0, \quad (6)$$

где $Z = Y + b$, $\theta = (t - t_{\text{ж}}) / (t_0 - t_{\text{ж}}) = \vartheta / \vartheta_0$, t_0 – температура ребра у его основания;

$N = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda \cdot \delta_0}} h$; $t_{\text{ж}}$ – температура окружающей жидкости, λ – коэффициент теплопроводности материала ребра, α – коэффициент теплоотдачи.

Для постановки краевой задачи дополним уравнение (6) граничными условиями: на границе ребра и цилиндрической стенки

$$\theta|_{Y=1} = 1; \quad (7)$$

на краю ребра

$$\left. \frac{d\theta}{dY} \right|_{Y=0} = 0. \quad (8)$$

Тепловая мощность, отводимая прямым ребром в окружающую среду:

$$Q_0 = 2 \int_0^h \alpha \vartheta dy. \quad (9)$$

В идеальном случае максимальная тепловая мощность, отводимая ребром $Q_{\max} = 2\alpha\vartheta_0 h$, отсюда получаем выражение для эффективности прямого ребра

$$\eta = Q_0 / Q_{\max} = \int_0^1 \theta \cdot dY. \quad (10)$$

При вынужденном обтекании пластин радиатора воздухом средний коэффициент теплоотдачи определяется по критериальному уравнению для турбулентного течения жидкости ($Re_{\text{жс}} = W_{\text{жс}} L / \nu_{\text{ж}} > 2 \cdot 10^5$) $Nu_{\text{жс},L} = 0,037 Re_{\text{жс}}^{0,8} Pr_{\text{жс}}^{0,43} (Pr_{\text{жс}} / Pr_c)^{0,25}$, где $\nu_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость; $W_{\text{жс}}$ – скорость потока воздуха вдоль ребер, $L = r_2 - r_1$ – для кольцевых ребер, $L = h$ – для прямых ребер.

Краевые задачи (1)–(3) и (6)–(8) решались как системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с использованием конечно-разностного метода. На основе созданной математической модели (1–10) с помощью пакета *Matlab* была разработана компьютерная программа «Расчет теплового состояния ребра». Она позволяет при различных входных данных рассчитывать температурное поле ребра заданной конфигурации, отводимую им тепловую мощность и эффективность. Результаты расчета представляются в виде графических зависимостей.

Проведено моделирование для составного подового электрода с воздушным охлаждением, имеющего медные кольцевые или прямые ребра различного профиля. Расчет выполнен при следующих условиях: $t_0 = 400$ °C; $r_1 = 0,1$ м; $t_{жс} = 30$ °C, $W_{жс} = 20$ м/с.

Температурное поле кольцевого и прямого ребер различного профиля при одинаковых площадях охлаждаемой поверхности ($lh = \pi r_2^2 - \pi r_1^2$) и контакта с подовым электродом ($l\delta_0 = 2\pi r_1\delta_0$) показано на рис. 2 и 3. Видно, что прямоугольный профиль дает максимальное значение температуры вдоль ребер, а значит максимальную отводимую мощность, которая в зависимости от типа и профиля составляла от 2 до 5 кВт.

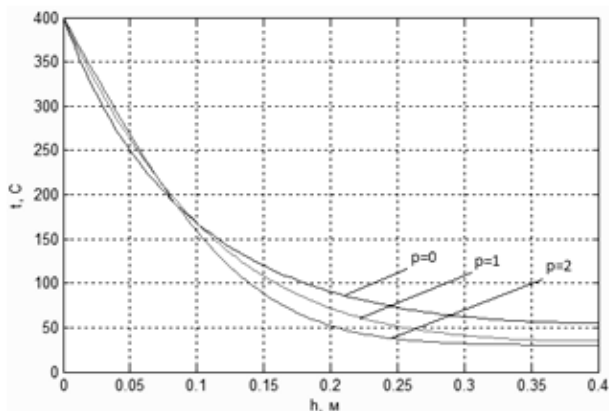


Рис. 2. Распределение температуры по радиусу кольцевого ребра при разных профилях p ($r_2 = 0,5$ м; $h_k = r_2 - r_1$; $\delta_0 = 0,005$ м)

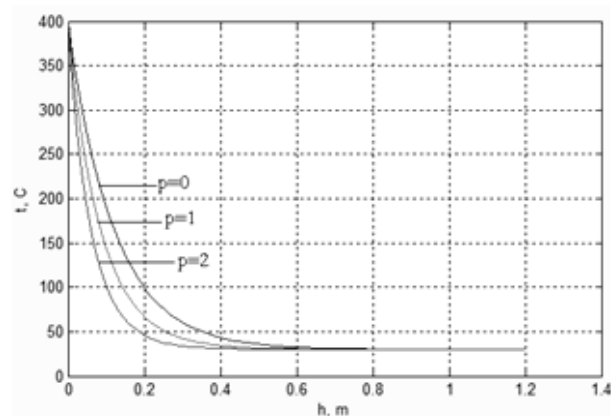


Рис. 3. Распределение температуры по высоте прямого ребра при разных профилях p ($l = 0,628$ м; $h_n = 1,2$ м; $\delta_0 = 0,005$ м)

Увеличение площади как кольцевого, так и прямого ребра при неизменных прочих параметрах приводит к снижению его эффективности (рис. 4), а значит, существуют оптимальные размеры ребра с точки зрения прироста его массы и отводимой тепловой мощности.

Таким образом, проведенный анализ тепловой работы рассматриваемых ребер показал, что наиболее эффективной является конструкция с кольцевыми ребрами прямоугольного профиля. При применении гиперболических профилей ребер уменьшается их масса, а значит, экономится материал, но это приводит к незначительному снижению (5–10%) отводимой тепловой мощности по сравнению с использованием прямоугольных ребер.

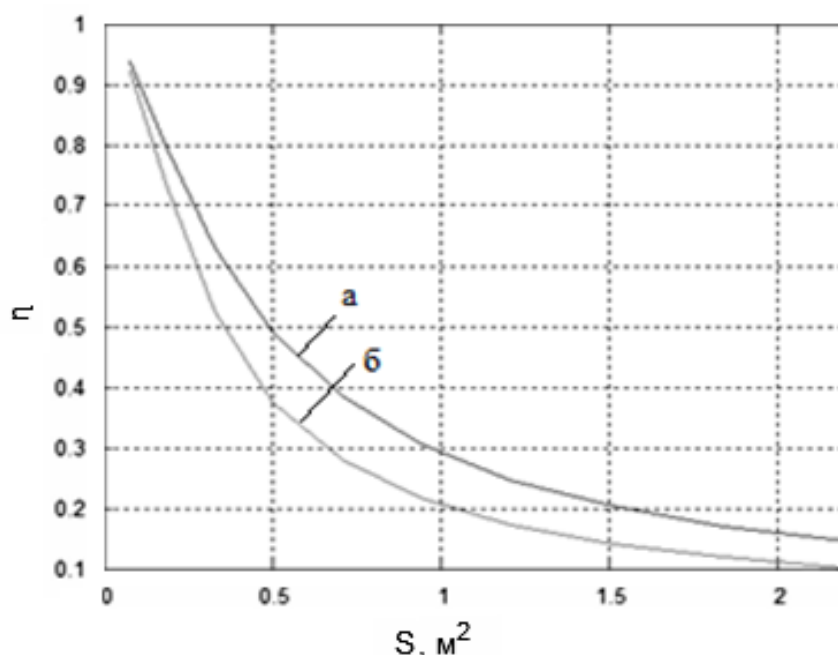


Рис. 4. Зависимость эффективности: *a* – кольцевого ребра;
б – прямого ребра от площади их поверхности при $l = 0,628$ м; $\delta_0 = 0,01$ м

Список использованных источников

1. Ячиков М. И., Ячиков И. М. Моделирование теплового состояния подового электрода ДППТ с водяным и воздушным охлаждением // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докладов II Всероссийской НПК студентов, аспирантов и молодых ученых. Екатеринбург: УрФУ, 2013. - С. 123–127.

2. Ройзен Л. И., Дулькин И. Н. Тепловой расчет оребренных поверхностей / под ред. В. Г. Фастовского. М.: Энергия, 1977. - 256 с.

УДК 669.056

Т. М. Насыров, В. Н. Летимин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

ПРОИЗВОДСТВО АГЛОМЕРАТЫШЕЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация

Изучен новый метод окускования железорудного материала, в частности тонкого железорудного концентрата – производство гибридного агломерата или агломератышей. В лабораторных условиях ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Носова» проведены исследования по